



## طراحی و ساخت لیزر فیبری ۵ کیلو وات به روش ترکیب آرایه‌ای

حسین فتحی، ابراهیم آقاییاری، علی همدانی گلشن، سید ناصر طباطبایی جعفری، مجید لفوتی، کامران حجاز، وحید وطنی، محمدصادق ذبیحی و سیدحسن نبوی.

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران، ایران.

چکیده - در این مقاله، طراحی و ساخت لیزر فیبری ۵ کیلو وات گزارش شده است. برای ساخت این لیزر، ۵ لیزر فیبری با توانی بیش از ۱ کیلو وات با طول موج ۱۰۸۰ نانومتر به روش آرایه‌ای با هم ترکیب شده‌اند. برای ترکیب پرتوهای لیزری، از منشورهای راست گوشه استفاده شده است. با طراحی و ساخت یک شاسی و جابجاگرهایی با ۵ درجه آزادی جهت نگه داشتن منشورها و تنظیم اپتیکی باریکه‌های لیزری، پرتوها به فیبری با مغزی ۲۰۰ میکرون و گشودگی عددی ۰/۲۲ تزویج شده‌اند. کیفیت پرتو نهایی در راستاهای  $x$  و  $y$  به ترتیب ۱۹/۲ و ۲۶/۴ اندازه‌گیری گردید و بازده توانی ترکیب حدود ۹۷ درصد است.

کلید واژه - لیزر فیبری، ترکیب آرایه‌ای پرتوها.

## Design and Fabrication of 5 KW Fiber Laser Using Array Beam Combining

Hossein Fathi, Ebrahim Aghayari, Ali Hamedani Gholshan, Seyed Naser Tabatabaei Jafari, Kamran Hejaz, Majid Lafouti, Vahid Vatani, Mohammad Sadegh Zabihi, Seyed Hassan Nabavi.

Iranian National Center for Laser Science and Technology (INLC), Tehran, Iran.

Abstract- Design and fabrication of a 5 kW fiber laser is reported. Manufacturing this laser is accomplished by means of lens array combining technique of five all-fiber lasers with power more than 1 kW, at 1080 nm wavelength. Right angle prisms are used for laser beam combination. Five output beam of lasers are coupled into a fiber with 200 $\mu$ m core diameter and NA=0.22. This made possible by design and fabrication of a module containing 5-degrees of freedom positioners to hold prisms and alignment of laser beams. The final output beam quality factor  $M^2$  is measured 19.2 and 26.4 along the  $x$ - and  $y$ -axis respectively and the combining power efficiency is about 97%.

Keywords: Fiber Laser, Array Beam Combining.

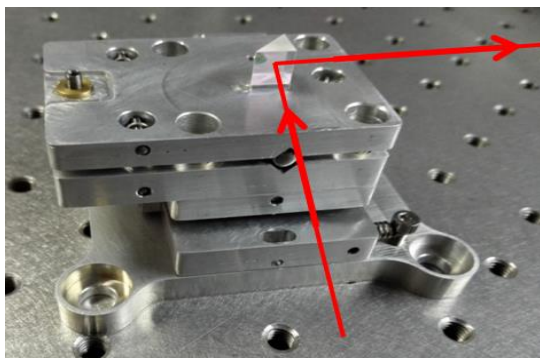
## ۱- مقدمه

بنابراین در این روش، درخشندگی پرتو نهایی کمتر و در بهترین حالت برابر با درخشندگی تک‌المان خواهد بود.

در این مقاله با ترکیب پنج لیزر فیبری با توانی بیش از ۱ کیلو وات، با روش ترکیب آرایه‌ای و در نهایت با تزویج پرتو حاصله درون یک فیبر نوری، امکان دستیابی به یک پرتو با توان ۵ کیلو وات فراهم شده است.

## ۲- شبیه‌سازی ترکیب پرتوها

لیزرهای فیبری مورد استفاده برای ترکیب، دارای فیبرهای خروجی با مغزی-غلاف ۲۰/۴۰۰ میکرون و گشودگی عددی ۰/۰۶ هستند. قسمت انتهایی این فیبرها به یک کانکتور-کالیماتور ساخت شرکت Optoskand متصل شده است. لنز موجود در این کالیماتور دارای فاصله کانونی ۵۰mm با پوشش ضد بازتاب در ناحیه IR می‌باشد. این لنز سبب می‌شود تا پرتو خروجی از آن دارای اندازه لکه ۶mm و واگرایی ۰/۴mrad باشد. از مشخصات بسیار مهم در ترکیب آرایه‌ای، ضریب پراش پرتوهای کنار هم چیده شده می‌باشد. این مشخصه به صورت نسبت قطر یک لکه (d) به فاصله بین مراکز لکه‌ها (D) تعریف می‌شود و مشخص‌کننده اندازه‌ی نهایی لکه‌های کنار هم چیده شده بر روی لنز تزویج‌گر می‌باشد. برای رسیدن به ضریب پراش بزرگ‌تر و اندازه لکه‌ی کوچک‌تر بر روی لنز تزویج‌گر از منشورهای راست‌گوشه استفاده شده است. پرتو خروجی هر لیزر توسط منشور ۹۰ درجه تغییر جهت داده و در راستای تزویج‌گر قرار می‌گیرد. برای نصب منشورها و اعمال تغییر جهت ذکر شده، جابجایی با ۵ درجه آزادی طراحی و ساخته شد (شکل ۲).

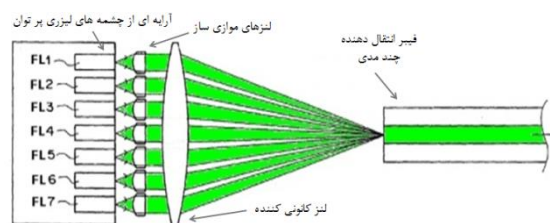


شکل ۲: نمای چیدمان منشور و نگه دارنده آن.

هر کدام از منشورها در صفحه عمود بر راستای تزویج‌گر نسبت به هم دارای جابجایی عرضی و افقی هستند و در

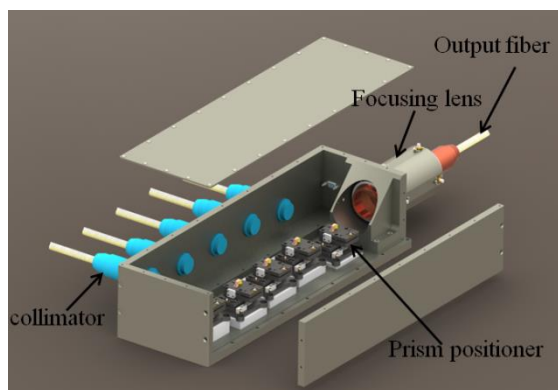
با توجه به پیشرفت‌های اخیر در عرصه طراحی و ساخت فیبرهای نوری و لیزرهای دیودی، امکان ساخت فیبرهایی با ناحیه مدی بزرگ و لیزرهای دیودی با درخشندگی بالا حاصل شده است. این امر سبب شده تا لیزرهای فیبری هم از جهت توان و هم از نظر کیفیت پرتو، متحول شوند. این لیزرها به دلیل داشتن برتری‌های خاص، در رتبه‌ی اول لیزرهای صنعتی قرار گرفته‌اند. از جمله مزیت‌های لیزرهای فیبری می‌توان به قابلیت دستیابی به توان‌های بالا، کیفیت پرتو عالی، کم‌حجم بودن، طول عمر طولانی، پایداری مناسب، هزینه پایین تعمیر و نگهداری، بازده اپتیکی بالا، خنک‌سازی آسان و بکارگیری ساده‌تر در مقایسه با سایر لیزرهای صنعتی اشاره نمود.

با توجه به محدودیتی که در ساخت ماژول‌های لیزری فیبری پرتوان وجود دارد، ابتدا باید ماژول‌هایی با حداکثر توان ممکن ساخته و سپس آنها را با یکدیگر ترکیب نمود. از جمله محدودیت‌های یاد شده، می‌توان به نوع رفتار قسمت‌های مختلف اجزا تشکیل‌دهنده لیزر همچون ماده فعال، ترکیب‌کننده‌ها و آینه‌های فیبری در توان‌های بالا اشاره نمود. توجه به اثرات غیرخطی و حرارتی هنگام ساخت لیزر از اهمیت زیادی برخوردار است. در حالت کلی پرتوهای لیزری می‌توانند با چهار روش همدوس [1]، طیفی [2]، قطبشی [3] و آرایه‌ای [4] با یکدیگر ترکیب شوند. در این کار از روش ترکیب آرایه‌ای با توجه به عدم نیاز به المان‌های کنترلی و قابلیت صنعتی‌سازی استفاده شده است. طرح‌واره‌ای از این روش در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: طرح‌واره‌ی روش ترکیب آرایه‌ای لیزرهای فیبری.

در روش ترکیب آرایه‌ای، باریکه‌های متعددی از لیزرهای فیبری پرتوان توسط آرایه‌ای از لنزها، موازی‌شده و با استفاده از لنز تزویج‌گر در فیبر انتقال‌دهنده تزویج می‌شوند. توان و اندازه‌ی پرتو ترکیب شده متناسب با تعداد المان‌ها بوده و واگرایی آن، به اندازه‌ی واگرایی یک المان منفرد می‌باشد.

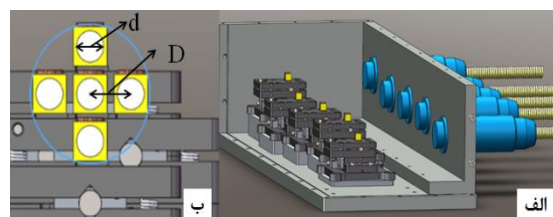


شکل ۵: طرحواره ی چیدمان ترکیب آرایه ای لیزرهای فیبری.

### ۳- نتایج تجربی

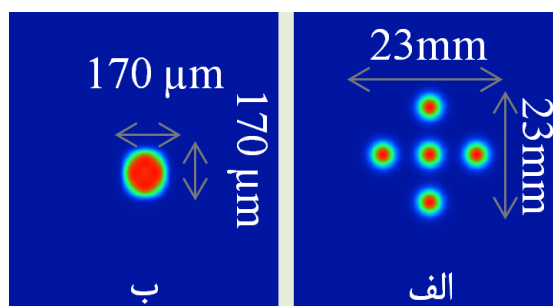
پس از آماده سازی شاسی و تجهیزات مورد نیاز ترکیب آرایه ای، کالیبراتور لیزرهای مورد استفاده برای ترکیب و نگهدارنده های منشور بر روی شاسی ترکیب نصب گردید. منشورها با استفاده از چسب اپتیکی مخصوص بر روی نگهدارنده ها نصب شد. پرتوهای لیزری پرتوان با استفاده از این منشورها، تغییر مسیر ۹۰ درجه ای داده و به صورت موازی با یکدیگر و در فاصله عرضی یکسان نسبت به هم، وارد تزویج گر می شوند. در تزویج پرتوها، بازدهی ترکیب با توازی پرتوهای ورودی و فاصله بین آنها رابطه مستقیم دارد. از اینرو تنظیمات اپتیکی اولیه با استفاده از نگهدارنده های منشور، در توان پایین انجام گردید و پروفایل پرتوها در محل ورودی لنز تزویج گر همانند شکل ۴-الف مشاهده شد. با توجه به ابعاد منشورها و چگالی توان بالا، تست حرارتی هریک از منشورها در توان یک کیلووات انجام شد. حداکثر دمای مشاهده شده برای منشورها، ۳۴ درجه ی سانتی گراد اندازه گیری شد. میزان اتلاف در بازتاب از منشورها کمتر از ۰/۳ درصد محاسبه گردید. پس از نصب تزویج گر، هم راستاسازی محور اصلی آن با پرتوهای ورودی انجام گردید (شکل ۶). در ادامه فیبری با قطر مغزی  $20\mu\text{m}$  و زاویه ی پذیرش ۰/۲۲ به تزویج گر متصل گردید. نمایی از سیستم ترکیب نهایی در شکل ۷ آورده شده است. پس از بهینه سازی بازدهی ترکیب با استفاده از پیچ های تنظیم تزویج گر در توان پایین، بازدهی ترکیب در توان های مختلف اندازه گیری شد. برای ترکیب نهایی در توان خروجی ۵ کیلووات از فیبر انتقال  $20\mu\text{m}$ ، بازدهی ۹۷ درصد به دست آمد.

امتداد راستای تزویج گر، در فاصله های طولی منظمی، نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند. مقدار این جابجایی های عرضی و افقی به اندازه لکه ی هر یک از لیزرها و ابعاد منشورهای استفاده شده و فاصله طولی منشورها به ابعاد کالیبراتور خروجی لیزرها و مانتهای نگهدارنده منشورها بستگی دارد. ابعاد منشورها  $7.5 \times 7.5$  میلی متر و فاصله ی عرضی بین آنها  $8.5$  میلی متر است. نتیجه این ترکیب، پرتویی با ضریب پرتشدگی ۶۶ درصد و اندازه لکه ی ۲۴ میلی متری بر روی لنز تزویج گر است (شکل ۳).



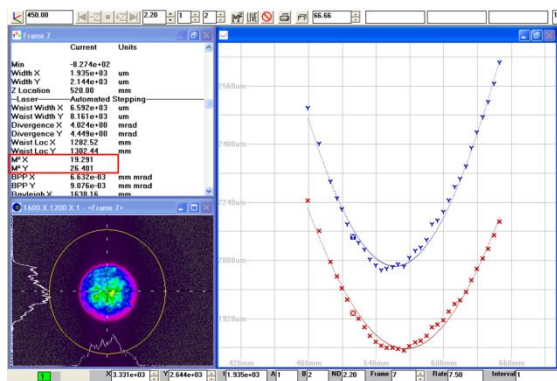
شکل ۳: الف- چیدمان منشورها، بر روی شاسی، ب- فاصله ی بین منشورها و لکه ها، در نمای عرضی،  $d=6\text{mm}$ ,  $D=8.5\text{mm}$ .

شبیه سازی ترکیب این لکه ها و تزویج آنها به فیبر توسط نرم افزار Zemax صورت گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که استفاده از لنزی با فاصله کانونی  $200\text{mm}$  و قطر دهانه ۲ اینچ، اندازه لکه ای برابر با  $170\mu\text{m}$  در محل کانون ایجاد می کند (شکل ۴). این اندازه لکه، قابلیت تزویج نور به فیبرهای با مغزی  $20\mu\text{m}$  و بالاتر را فراهم می کند. در چیدمان آزمایشگاهی و همچنین در چیدمان صنعتی شده آن، تزویج به فیبر با مغزی  $20\mu\text{m}$  صورت گرفته است.



شکل ۴: الف- شبیه سازی نمایی پرتو بر روی لنز تزویج گر، ب- نمایی لکه کانونی شده توسط لنز تزویج گر.

پس از انجام شبیه سازی اپتیکی، طراحی شاسی و چیدمان اجزا ترکیب در نرم افزار Solidworks انجام پذیرفت. طرحواره ای از این چیدمان در شکل ۵ قابل مشاهده است.



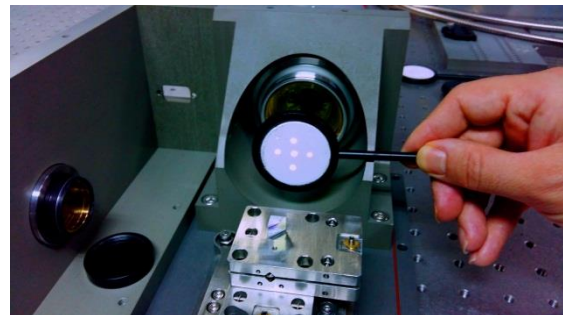
شکل ۸: اندازه‌گیری کیفیت باریکه، برای پرتو خروجی نهایی از فیبر  $200\mu\text{m}$ ، در توان ۵ کیلووات، با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری کیفیت پرتو ( $M^2$ -meter).

#### ۴- نتیجه‌گیری

خروجی ۵ لیزر با توانی بیش از ۱ کیلو وات و در طول موج  $1080\text{ nm}$  به روش آرایه‌ای با هم ترکیب شد. برای ترکیب پرتوهای لیزر، از منشورهای راست‌گوشه استفاده شده‌است. با طراحی و ساخت یک شاسی و جابجاگرهایی با ۵ درجه آزادی جهت نگه داشتن و تنظیم اپتیک باریکه‌های لیزر، پرتوهای خروجی به فیبری با مغزی  $200\text{ }\mu\text{m}$  میکرون و گشودگی عددی  $0.22$  تزویج شده‌است. کیفیت پرتو نهایی در راستاهای  $x$  و  $y$  به ترتیب  $19/2$  و  $26/4$  گزارش شده‌است. بازده توانی تزویج به فیبر حدود  $97\%$  درصد بوده و میزان بالای بازدهی به دلیل لایه‌نشانی ضد بازتاب در ناحیه IR بر روی اپتیک استفاده شده و سطوح ابتدایی و انتهایی فیبرهای انتقال است. در مجموع توان  $5\text{ kW}$  کیلووات از فیبر خروجی مشاهده و اندازه‌گیری شد. روش ترکیب آرایه‌ای این قابلیت را دارد که با استفاده از آن بتوان به توان‌های بالاتری نیز دست یافت.

#### مراجع

- [1] Zhou et al, Coherent beam combining of fiber amplifiers using SPGD algorithm and its application, IEEE Journal Of SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTro, V.15, No.2, 2009.
- [2] O. Andrusyak, Spectral beam combining of fiber lasers with increased channel density, Proc. of SPIE Vol. 6453 64531L-1.
- [3] R. Uberna, Coherent polarization beam combination, IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 46, NO. 8, AUGUST 2010.
- [4] C. Bellanger, A. Brignon, Design of a fiber-collimated array for beam combining, Optical Engineering, V.50, No.2, 2011.



شکل ۶: نمایی از سطح مقطع باریکه‌های موازی شده قبل از ورود به تزویج‌گر.



شکل ۷: نمایی از چیدمان ترکیب آرایه‌ای پرتوهای لیزر فیبری با استفاده از منشورهای راست‌گوشه قرار گرفته بر روی نگهدارنده‌هایی با ۵ درجه‌ی آزادی.

پس از ترکیب آرایه‌ای باریکه‌ها، کیفیت باریکه‌ی نهایی، با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری کیفیت باریکه، اندازه‌گیری شد. اعداد به دست آمده برای دو راستای  $x$  و  $y$  به ترتیب  $19/2$  و  $26/4$  به دست آمده‌است. اختلاف کیفیت پرتو در دو راستا، ناشی از عدم تقارن ناچیز پرتوها در سطح ورودی لنز تزویج‌گر است که با انجام تنظیمات دقیق‌تر و مشاهده هم‌زمان کیفیت پرتو اندازه‌گیری شده، قابل رفع می‌باشد. پروفایل باریکه‌ی نهایی به همراه نتایج مربوط به اندازه‌گیری کیفیت باریکه در شکل ۸ آورده شده‌است.